

Неинвазивный мониторинг церебральной оксиметрии у детей

Резюме. В данном обзоре представлен ряд литературных источников, описывающих применение церебральной оксиметрии с использованием инфракрасной спектроскопии у детей. Множество клинических исследований показывают, что, несмотря на некоторые недостатки, неинвазивный мониторинг церебральной оксиметрии является важным инструментом защиты мозга, в первую очередь там, где может присутствовать ятрогенная ишемия головного мозга. Возрастает и количество данных об использовании инфракрасной спектроскопии в таких областях, как педиатрическая кардиохирургия, педиатрическая нейрохирургия, педиатрическая и неонатальная интенсивная терапия. В целом исследования показывают возрастающую роль мониторинга церебральной и соматической оксиметрии. Этот метод представляется полезным как при анестезии, так и в отделениях интенсивной терапии. Однако в настоящее время недостаточно клинических данных о критических уровнях измеряемых переменных, которые необходимы для безопасного ведения периоперационного периода у восприимчивых к церебральной ишемии пациентов, в частности в педиатрии.

Ключевые слова: дети; обзор, инфракрасная спектроскопия; региональная церебральная кислородная насыщенность; церебральная оксиметрия; анестезия

Оценка функционального состояния головного мозга пациента во время проведения общей анестезии и в послеоперационном периоде наряду с поддержкой адекватных показателей гемодинамики, функции дыхания и анальгезии является одной из главных проблем анестезиологического мониторинга, так как одно из лидирующих мест в статистике анестезиологических осложнений занимает гипоксическое поражение головного мозга [1]. Несмотря на существование большого количества методов оценки церебральной гемодинамики, в современной литературе имеются лишь ограниченные сведения о показателях кислородного статуса головного мозга во время использования различных видов анестезии. Это объясняется тем, что, во-первых, процесс доставки кислорода в ткани головного мозга является сложным, многокомпонентным, зависящим от многих показателей (си-

стемной и регионарной гемодинамики, кислородной емкости крови, метаболических потребностей); во-вторых, существующие в настоящее время методы оценки параметров кислородного статуса являются или слишком громоздкими для применения в условиях операционной, или инвазивными, что ограничивает их использование в повседневной практике [2].

В настоящее время активно используется метод церебральной оксиметрии (спектроскопии). Основными его преимуществами перед другими методами оценки церебральной оксигенации являются информативность, неинвазивность и безопасность [3, 4]. О том, что ткани мозга имеют относительно высокую степень прозрачности в инфракрасном диапазоне (NIR) при использовании спектроскопии, было сообщено в 1977 году Jobisis. В 1985 году Ferrari и его коллеги сообщили о первых исследованиях с

использованием инфракрасной спектроскопии (NIRS) у людей, после чего управление по контролю за продуктами и лекарствами США (FDA) одобрило в 1993 году первое коммерческое устройство для определения мозговой оксигенации INVOS 3100 w [5, 6].

Насыщение кислородом ткани и тканевого гемоглобина определяется разницей в интенсивности между переданным и принимаемым светом. Глубина проникновения через ткань пропорциональна средней длине пути фотонов. Передача света на заданной длине волны через ткань зависит от сочетания ряда факторов, таких как отражение, рассеивание и поглощающие эффекты. Отражение — это функция угла светового пучка и поверхности ткани, рассеивание определяется составом и количеством частиц ткани, в то время как поглощение определяется молекулярными свойствами вещества. В пределах диапазона NIR поглощающие свет молекулы в тканях представляют собой сложные комплексные хромофоры: гемоглобин, билирубин и цитохром. Длины волн NIR, используемые в коммерческих устройствах, выбираются как чувствительные к этим биологически важным хромофорам, и обычно используют длины волн от 700 до 850 нм, где спектры поглощения Hb и HbO₂ максимально перекрыты [7]. Также важно подчеркнуть, что чрескожная NIRS отражает неоднородную ткань, содержащую артерии, вены и капиллярные сети, а также другие невазкуляризованные ткани. Фотоны должны проникать в несколько слоев ткани, включая кожу головы, череп и твердую мозговую оболочку, которые могут содержать различные концентрации крови и хромофоров. Поскольку средняя глубина проникновения фотонов приближается к 1/3 расстояния передатчик/приемник, использование двух приемников на определенном расстоянии друг от друга обеспечивает пространственное решение для различения сигналов от церебральной и экстрацеребральной ткани. Увеличение же расстояния передатчик/приемник увеличивает глубину проникновения и минимизирует эффект внемозговой ткани. Находящийся ближе приемник обнаруживает преимущественно поверхностные ткани, тогда как более дальний оптический элемент отражает более глубокую ткань [8]. Церебральные устройства NIRS измеряют среднее насыщение ткани кислородом и отражают насыщение гемоглобина кислородом в венозной, капиллярной и артериальной крови. Многочисленные исследования показывают, что большинство клинических устройств NIRS предполагает венозно-артериальное распределение в кортикальной ткани — 70/30 %. Вследствие этого изменения в rSO₂ в значительной степени отражают изменения в насыщении кислородом венозной крови, но могут варьировать между пациентами [9, 10]. Также разработчики устройств пришли к выводу, что оксигенация экстрацеребральной ткани оказывает незначительное влияние. Меланин в коже ограничивается эпидермальным слоем на глубине

50–100 мкм и не создает значительного ослабления сигнала NIRS [11]. Однако конъюгированный билирубин имеет пик поглощения при длине волны 730 нм, что вызывало некоторое беспокойство насчет способности NIRS оценивать церебральную оксигенацию (rSO₂) при наличии желтухи. Но в исследовании, включающем 48 пациентов, при трансплантации печени концентрация билирубина в плазме не влияла на увеличение rSO₂. Этот факт подтверждает необходимость устанавливать базовое значение для каждого пациента индивидуально и контролировать отклонения от этой базовой линии, а не полагаться в первую очередь на конкретное пороговое значение [12]. Насыщенность кислородом неметаболизирующей ткани может быть высокой или низкой или может быть нормальной в мертвом или неметаболизирующем мозге из-за секвестрированной венозной крови в капиллярах и венозных сосудах [13]. Maeda и его коллеги исследовали церебральную кислородную насыщенность при 214 вскрытиях и обнаружили, что значения колеблются от 0,3 до 95,1 %, по-видимому вследствие общего содержания гемоглобина, причины смерти и условий хранения трупов. Соответственно, rSO₂ или другие показатели насыщения кислородом мозга могут указывать на ошибку, которая отражает патофизиологию неметаболизирующей, но не перфузируемой ткани [14]. Множество клинических исследований показали, что, несмотря на некоторые недостатки, значимость мониторинга мозговой оксиметрии для выявления клинически бессимптомных эпизодов мозговой ишемии в различных клинических ситуациях делает его важным инструментом защиты мозга. Правильное управление оксигенацией мозга является одним из приоритетов всех анестезиологических процедур, но головной мозг остается одним из наименее контролируемых органов во время анестезии.

Есть некоторые медицинские процедуры, при которых присутствует ятрогенная ишемия головного мозга, такие как каротидная эндартерэктомия, хирургическое лечение аневризм мозга, гипотермическая остановка кровообращения для операций на дуге аорты и др. Было проведено несколько ретроспективных исследований церебральной оксиметрии при кардиохирургических операциях, которые показали улучшение результатов, связанных с мониторингом мозговой оксиметрии, и корреляцию между мозговой десатурацией и неблагоприятными исходами [15]. Однако на сегодняшний день относительно мало рандомизированных исследований, проведенных с клиническими испытаниями. В исследовании, использующем церебральную оксиметрию у 265 пациентов, перенесших операции на сердце, рандомизированных на группу с мониторингом и контрольную группу, в которой мониторинг проводился слепым методом, была установлена значительная корреляция между длительной десатурацией головного мозга и когнитивными нарушениями, а также трехкратный повышенный

риск длительного пребывания в больнице [16]. Однако темпы десатурации головного мозга были аналогичными в обеих группах в результате неотработанного протокола коррекции десатурации, чем и объясняется то, что существенной разницы в частоте когнитивной дисфункции между группами также не отмечалось. В проспективном рандомизированном слепом исследовании среди 200 пациентов, перенесших трансплантацию коронарной артерии, лечение, направленное на снижение значений rSO_2 , предотвратило длительную церебральную десатурацию. Протокол, принятый для возвращения rSO_2 к исходному уровню, привел к быстрому улучшению rSO_2 в 84 % случаев и значительному сокращению частоты периоперационного инсульта — с 2 до 0,97 % [17, 18].

Умеренная и глубокая гипотермия остается основной для церебральной и системной защиты при хирургических вмешательствах на дуге аорты, поскольку хирургический доступ может потребовать прерывания системной перфузии на относительно затяжные периоды времени. Поскольку сравнительно мало возможностей для контроля мозговой функции в такие моменты, совместно с ЭЭГ NIRS пропагандируется как средство мониторинга для выявления начала церебральной ишемии во время глубокой гипотермической остановки кровообращения [19, 20]. В исследовании, в которое вошло 46 пациентов, которым проводилась селективная мозговая перфузия (SACP) путем перфузии правой подключичной артерии (с левой сонной артерией или без), двусторонний региональный индекс насыщения кислородом мозговой ткани контролировался INVOS 4100 NIRS. Во время селективной антеградной церебральной перфузии насыщение кислородом церебральной ткани уменьшилось до 86 % от базовой линии. Шесть пациентов умерли в больнице, и у шести пациентов (13 %) наблюдался периоперационный инсульт (пациенты, у которых значения rSO_2 были значительно ниже базовой линии во время SACP). Был сделан вывод о том, что мониторинг насыщения кислородом церебральной ткани методом NIRS во время SACP позволяет выявлять клинически важные церебральные десатурации и может помочь предсказать периоперационные неврологические осложнения [21]. Также имеется ряд сообщений, в которых показано, что церебральная оксиметрия обнаруживает церебральную гипоперфузию среди множества факторов, в том числе окклюзию каротидного просвета [22], интраоперационный тромбоз общего каротидного трансплантата [23], обструкцию перфузионной канюли во время SACP [24] или из-за уменьшения шунтирующего потока после кардиохирургических операций [25]. Такие средства мониторинга, как транскраниальная доплерография (TCD), ЭЭГ и соматосенсорные вызванные потенциалы (SSEP), успешно использовались в сосудистой и кардиохирургии в течение многих лет, но имеют определенные ограничения и недостатки. При-

близительно у 20 % пациентов доплерография не может выполняться из-за отсутствия транскраниальных окон, в то время как на показатели SSEP и EEG влияют анестезирующие средства и электрокоагуляция [26]. По сравнению с другими методами неинвазивные устройства NIRS являются легкими и простыми в использовании и обеспечивают непрерывное измерение насыщения кислородом церебральной ткани.

Основная цель большинства исследований с использованием интраоперационных NIRS во время сосудистых и кардиологических операций — определять чувствительность и специфичность изменений в мозговой rSO_2 как показатель, коррелированный с клиническими признаками церебральной ишемии или другими методами нейромониторинга. Одно из первых исследований, проведенное в 1998 году, показало положительную корреляцию между TCD и NIRS, сравнивающих процентное изменение скорости потока в средней мозговой артерии и изменение rSO_2 [27]. Был использован регрессионный анализ для оценки специфичности и чувствительности различных уровней rSO_2 для обнаружения неврологически определяемой интраоперационной ишемии головного мозга. Была обнаружена 80% чувствительность со специфичностью 82 %. Уменьшение rSO_2 на 16–18 % было предиктором неврологических нарушений. Эти данные используются для определения различных значений rSO_2 как показатель необходимости шунтирования или другого фармакологического или физиологического вмешательства. В работе 2005 года А. Casati с соавторами указывает на пользу использования мониторинга церебральной оксигенации у пожилых пациентов в абдоминальной хирургии. Авторы показывают, что этот метод мониторинга уменьшает количество когнитивных нарушений и обеспечивает более короткие сроки пребывания в больнице [28].

Использование NIRS также было изучено у пациентов с черепно-мозговой травмой. Однако результаты были неоднозначными. Слабая корреляция с внутричерепным давлением и яремной оксиметрией указывает на низкую чувствительность церебральной оксиметрии после острого повреждения головного мозга; но имеется и хорошая чувствительность церебральной оксиметрии для обнаружения внутричерепных гематом, коррелирующая с данными томографии или MPT [29]. В недавнем исследовании у пациентов с субарахноидальным кровоизлиянием эпизоды ангиографического церебрального вазоспазма были тесно связаны с уменьшением сигнала NIRS [30]. Церебральная оксиметрия при черепно-мозговой травме в настоящее время остается областью для дальнейших исследований [31].

В сложных условиях, таких как педиатрическая кардиохирургия, педиатрическая нейрохирургия, педиатрическая и неонатальная интенсивная терапия, NIRS в сочетании с BIS все чаще используется для обнаружения эпизодов церебральной ишемии

как во время операции, так и в послеоперационном периоде [32].

В одном из исследований, в котором церебральная оксиметрия была использована для оценки мозгового кровообращения у 11 недоношенных новорожденных с 145 эпизодами апноэ, было обнаружено значительное изменение мозговой циркуляции во время эпизода апноэ [33]. Стандартный мониторинг, включающий SpO_2 , частоту сердечных сокращений, частоту дыхания и артериальное давление, сравнивали с изменением объема мозговой крови и оксигенацией головного мозга во время эпизодов апноэ. Было обнаружено, что, когда значение SpO_2 опускалось ниже 85 %, общий объем мозговой крови увеличивался, а rSO_2 уменьшалась. В исследовании, целью которого была оценка чувствительности и специфичности значений церебральной оксиметрии в диагностике гиперкапнии, была показана существенная положительная корреляция между EtCO_2 и NIRS ($r = 0,479$, $p < 0,001$). Уровни NIRS были значительно выше ($p < 0,001$) в группе с $\text{pCO}_2 > 45$; $\text{EtCO}_2 > 40$ и $\text{pH} < 7,35$ по сравнению с группой с $\text{PCO}_2 < 45$; $\text{EtCO}_2 < 40$ и $\text{pH} \geq 7,35$. Результаты данного исследования показывают, что высокие значения NIRS также могут свидетельствовать о гиперкапнии, связанной с увеличением мозгового кровотока [34].

При асфиксии новорожденных умеренное охлаждение мозга используется как попытка свести к минимуму риск возникновения повторных эпизодов церебральных гиперемий и кровоизлияний. В недавнем исследовании, в котором церебральную оксиметрию и ЭЭГ использовали для документирования изменений в перфузии головного мозга при мягком системном охлаждении, церебральные NIRS выявили снижение объема мозговой крови во время охлаждения, тогда как оксигенация мозга оставалась стабильной [35]. Tortoriello и коллеги одобрили использование NIRS в детской кардиохирургии и продемонстрировали положительную корреляцию между rSO_2 и SvO_2 [36]. В более крупном исследовании среди 155 новорожденных в критическом состоянии индекс оксигенации мозговой ткани коррелировал с насыщением кислородом артериальной крови, артериовенозной разницей и насыщением кислородом смешанной (центральной) венозной крови [37]. В исследовании 20 педиатрических кардиохирургических пациентов с интраоперационным мониторингом rSO_2 и SvO_2 было показано, что церебральная rSO_2 более чувствительна к церебральной десатурации и, таким образом, является ранним и чувствительным показателем адекватности перфузии мозга [38]. Еще в одном исследовании, проведенном в период с июля по октябрь 2011 года, в котором были проанализированы интра- и послеоперационные периоды у 22 пациентов, подвергшихся плановой кардиохирургии для коррекции врожденных пороков сердца (оценка десатурации проводилась путем умножения rSO_2 ниже 50% порога на время в секундах), было по-

казано, что у 13 из 22 пациентов (62 %) наблюдалась интраоперационная церебральная десатурация ($\text{rSO}_2 > 3000$ % в 1 секунду) [39]. Пациенты с десатурацией $\text{rSO}_2 > 3000$ % в 1 секунду имели значительно более низкие показатели интраоперационной центральной венозной сатурации (SvO_2 , $p = 0,002$), сердечного индекса (CI, $p = 0,004$), индекса доставки кислорода (DO_2 , $p = 0,0004$) и значительно более высокие значения экстракции кислорода (ERO_2 , $p = 0,0005$) по сравнению с пациентами с оценкой десатурации $\text{rSO}_2 < 3000$ % в 1 секунду. Авторы делают вывод, что интраоперационное использование NIRS позволяет в ранние сроки выявить признаки гемодинамических и метаболических нарушений, позволяя быстро проводить их коррекцию для предупреждения потенциально опасных для жизни осложнений. Также и в послеоперационном периоде десатурация rSO_2 имеет более сильную связь с послеоперационными осложнениями, чем лактат, и является более ранним предупреждением о гемодинамическом или метаболическом нарушении. Изучая взаимосвязи между показателями NIRS и показателями пульсоксиметрии, J.D. Tobias в своем исследовании среди детей в возрасте от 1 месяца до 7 лет показал, что время для уменьшения rSO_2 на 10 % составляло 138 ± 29 секунд против 189 ± 64 секунды для уменьшения SaO_2 на 10 % ($P = 0,0009$), и также сделал вывод, что мониторинг церебральной оксигенации с использованием инфракрасной спектроскопии обнаруживает изменения в оксигенации ранее, чем стандартная пульсоксиметрия [40].

Также недавно в нескольких исследованиях была изучена церебральная оксигенация у младенцев во время некардиологических операций. Было продемонстрировано, что у детей в возрасте до 2 лет снижение rSO_2 было тесно связано с очень низким средним артериальным давлением [41]. Но результаты последующих работ показывают, что церебральная оксигенация остается неизменной или умеренно снижается во время событий с низким артериальным давлением. Это указывает на то, что артериальное давление находится в пределах ауторегуляции головного мозга или что соотношение доставки и потребления кислорода в тканях не изменяется, что, в свою очередь, связано с уменьшением скорости метаболизма головного мозга при общей анестезии, приводящим к меньшему потреблению кислорода головным мозгом, чем в бодрствующем состоянии [42]. Отношение же уменьшенной rSO_2 к неврологическим повреждениям остается неопределенным. В исследовании Verhagen показана связь между низкой церебральной rSO_2 (менее 50 %) в первые 2 недели жизни и низкими результатами развития, измеренными по шкале Бейли, этих же детей в возрасте от 2 до 3 лет [43]. Эти результаты дополняют аналогичное исследование, проведенное Alderliesten, где результаты нейродеструкции сравнивались с церебральной rSO_2 и артериальным давлением в группе недоношенных детей [44]. Они обнаружили связь между

низкими значениями rSO_2 и более низкими показателями развития нервной системы, но отсутствие связи между гипотонией и нейроразвитием. Это может указывать на ограничения использования артериального давления как маркера церебральной перфузии, а также важность применения мониторинга rSO_2 в дополнение к стандартным параметрам артериального давления, пульсовой оксиметрии. В работе, опубликованной в 2018 году, показана ценность одновременного мониторинга гемодинамического статуса с использованием NIRS и неинвазивного мониторинга сердечного выброса и индекса у детей с серповидноклеточной анемией во время болевого синдрома [45]. Авторы показывают, что после начала терапии болевого синдрома внутривенным введением жидкости (20 мл/кг) и парентеральных опиоидов сердечный выброс и сердечный индекс постепенно повышались аналогично rSO_2 ($r = -0,359$), максимально в течение часа, но церебральная оксигенация, измеренная мозговым оксиметром, улучшалась намного раньше, быстрее почти на 26 мин ($p = 0,003$).

Возрастает интерес и к использованию мозговых оксиметрических датчиков для контроля адекватности перфузии тканей при размещении на соматических участках как у взрослых, так и у детей [46–48]. Сообщается, что NIRS использовалась с целью сравнения оксигенации тканей печени (TOI) с SvO_2 и кишечной перфузией, измеренной через pH желудка у 20 педиатрических пациентов при нейрохирургических операциях с ожидаемой большой кровопотерей [49]. Хотя была продемонстрирована только умеренная положительная корреляция между TOI и желудочным pH, была показана тесная корреляция с SvO_2 . Совсем недавно в исследовании была продемонстрирована корреляция между почечной rSO_2 , rSO_2 брюшной полости, показателем желудочной тонометрии, SvO_2 и уровнем лактата крови у 20 новорожденных в течение 48 часов после операций по поводу врожденных пороков сердца [50]. Была продемонстрирована сильная корреляция между абдоминальной rSO_2 и pH, а также между абдоминальной rSO_2 и SvO_2 и значительная отрицательная корреляция между брюшной rSO_2 и сывороточным лактатом. Соматическая NIRS также исследуется как индикатор необходимости переливания крови у пациентов с травмой, которые находятся в группе высокого риска развития геморрагического шока [51]. Минимальная соматическая rSO_2 в 70 % случаев коррелировала с необходимостью переливания крови с чувствительностью 88 % и специфичностью 78 %, тогда как при гипотонии, тахикардии, лактате крови, дефиците оснований или гемоглобина не наблюдалось такой корреляции. Автор пришел к выводу, что соматическая rSO_2 может представлять собой важный скрининг-инструмент для выявления пациентов с травмой, которым требуется переливание компонентов крови. Таким образом, данный вид мониторинга представляется перспективным для дальнейшего изучения.

В целом исследования показывают возрастающую роль мониторинга церебральной и соматической оксиметрии. Этот метод представляется полезным как при анестезии, так и в отделениях интенсивной терапии, что позволяет избежать более инвазивных методов мониторинга. В педиатрической анестезии измерение оксигенации гемоглобина церебральной ткани в реальном времени с использованием инфракрасной спектроскопии широко используется в отделениях кардиохирургии и неонатальной и педиатрической реанимации, но редко применяется вне этих областей. Определение низкой церебральной оксигенации во время анестезии у детей, а также связанных с ней физиологических факторов, таких как гипотония и гипоксемия, могло бы улучшить безопасность анестезии, поскольку эти механизмы могут быть предотвратимыми причинами неврологического повреждения. Однако в настоящее время недостаточно клинических данных о критических уровнях измеряемых переменных, которые необходимы для безопасного ведения периоперационного периода восприимчивых к церебральной ишемии пациентов, в частности в педиатрии.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии какого-либо конфликта интересов при подготовке данной статьи.

Список литературы

1. Vutskits L., Xie Z. Long-term effects of general anesthesia on the brain: mechanisms and relevance // *Nat. Rev. Neurosci.* — 2016. — Vol. 17. — P. 705-17.
2. Williams M., Lee J.K. Intraoperative blood pressure and perfusion of the brain: strategies for clarifying hemodynamic goals // *Paediatr. Anaesth.* — 2014. — Vol. 24. — P. 657-67.
3. Bickler P.E., Feiner J.R., Rollins M.D. Factors affecting the performance of 5 brain oximeters during hypoxia in healthy volunteers // *Anesth. Analg.* — 2013. — Vol. 117. — P. 813-23.
4. Weiss M., Vutskits L., Hansen T.G., Engelhardt T. Safe anesthesia for each purpose: the SAFETOTS initiative // *Curr. Opin. Anaesthesiol.* — 2015. — Vol. 28. — P. 302-7.
5. Jobsis F.F. Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters // *Science.* — 197. — Vol. 198. — P. 1264-7.
6. Ferrari M., Giannini I., Sideri G., Zanette E. Continuous non invasive monitoring of human brain by near infrared spectroscopy // *Adv. Exp. Med. Biol.* — 1985. — Vol. 191. — P. 873-82.
7. McCormick P.W., Stewart M., Goetting M.G., Dujovny M., Lewis G., Ausman J.I. Noninvasive cerebral optical spectroscopy for monitoring cerebral oxygen delivery and hemodynamics // *Crit. Care Med.* — 1991. — Vol. 19. — P. 89-97.
8. Germon T.J., Evans P.D., Barnett N.J., Wall P., Manara A.R., Nelson R.J. Cerebral near infrared spectroscopy: emitter-toxicity must be increased // *Br. J. Anaesth.* — 1999. — Vol. 82. — P. 831-7.
9. McCormick P.W., Stewart M., Goetting M.G., Balakrishnan G. Regional cerebrovascular oxygen saturation measured by optical spectroscopy in humans // *Stroke.* — 1991. — Vol. 22. — P. 596-602.

10. Ito H., Kanno I., Fukuda H. Human cerebral circulation: positron emission tomography studies // *Ann. Nucl. Med.* — 2005. — Vol. 19. — P. 65-74.
11. Pringle J., Roberts C., Kohl M., Lekeux P. Near infrared spectroscopy in large animals: optical pathlength and influence of hair covering and epidermal pigmentation // *Vet. J.* — 1999. — Vol. 158. — P. 48-52.
12. Madsen P.L., Skak C., Rasmussen A., Secher N.H. Interference of cerebral near-infrared oximetry in patients with icterus // *Anesth. Analg.* — 2000. — Vol. 90. — P. 489-93.
13. Schwarz G., Litscher G., Kleinert R., Jobstmann R. Cerebral oximetry in dead subjects // *J. Neurosurg. Anesthesiol.* — 1996. — Vol. 8. — P. 189-93.
14. Maeda H., Fukita K., Oritani S., Ishida K., Zhu B.L. Evaluation of post-mortem oximetry with reference to the causes of death // *Forensic Sci Internat.* — 1997. — Vol. 87. — P. 201-10.
15. Edmonds H.L. Jr, Ganzel B.L., Austin E.H. III Cerebral oximetry for cardiac and vascular surgery // *Semin. Cardiothorac. Vasc. Anesth.* — 2004. — Vol. 8. — P. 147-66.
16. Slater J.P., Guarino T., Stack J. et al. Cerebral oxygen desaturation predicts cognitive decline and longer hospital stay after cardiac surgery // *Ann. Thorac. Surg.* — 2009. — Vol. 87. — P. 36-44.
17. Murkin J.M., Adams S.J., Novick R.J. et al. Monitoring brain oxygen saturation during coronary bypass surgery: a randomized, prospective study // *Anesth. Analg.* — 2007. — Vol. 104. — P. 51-8.
18. Goldman S., Sutter F., Ferdinand F., Trace C. Optimizing intraoperative cerebral oxygen delivery using noninvasive cerebral oximetry decreases the incidence of stroke for cardiac surgical patients // *Heart Surg. Forum.* — 2004. — Vol. 7. — P. 376-81.
19. Kurth CD, Steven JM, Nicolson SC. / Cerebral oxygenation during pediatric cardiac surgery using deep hypothermic circulatory arrest // *Anesthesiology.* — 1995. — Vol. 82. — P. 74-82.
20. Kurth C.D., Steven J.M., Nicolson S.C., Chance B., Delivoria-Papadopoulos M. Kinetics of cerebral deoxygenation during deep hypothermic circulatory arrest in neonates // *Anesthesiology.* — 1992. — Vol. 77. — P. 656-61.
21. Olsson C., Thelin S. Regional cerebral saturation monitoring with near-infrared spectroscopy during selective antegrade cerebral perfusion: diagnostic performance and relationship to postoperative stroke // *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* — 2006 — Vol. 131. — P. 371-9.
22. Janelle G.M., Mnookin S., Gravenstein N., Martin T.D., Urdaneta F. Unilateral cerebral oxygen desaturations during emergent repair of a DeBakey type I aortic dissection: potential aversion of a major catastrophe // *Anesthesiology.* — 2002. — Vol. 96 — P. 1263-5.
23. Santo K.C., Barrios A., Dandekar U., Riley P., Guest P., Bonser R.S. Near-infrared spectroscopy: an important monitoring tool during hybrid aortic arch replacement // *Anesth. Analg.* — 2008. — Vol. 107. — P. 793-6.
24. Sakaguchi G., Komiya T., Tamura N. et al. Cerebral malperfusion in acute type A dissection: direct innominate artery cannulation // *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* — 2005. — Vol. 129. — P. 1190-1.
25. Rossi M., Tirotta C.F., Lagueruela R.G., Madril D. Diminished Blalock-Taussig shunt flow detected by cerebral oximetry // *Paediatr. Anaesth.* — 2007. — Vol. 7. — P. 72-4.
26. Hans S.S., Jareunpoon O. Prospective evaluation of electroencephalography, carotid artery stump pressure, and neurologic changes during 314 consecutive carotid endarterectomies performed in awake patients // *J. Vasc. Surg.* — 2007. — Vol. 45. — P. 511-5.
27. Kirkpatrick P.J., Lam J., Al-Rawi P., Smielewski P., Czosnyka M. Defining thresholds for critical ischemia by using near-infrared spectroscopy in the adult brain // *J. Neurosurg.* — 1998. — Vol. 89. — P. 389-94.
28. Casati A., Fanelli G., Pietropaoli P., Proietti R., Tufano R., Danelli G., Fierro G., De Cosmo G., Servillo G. Continuous monitoring of cerebral oxygen saturation in elderly patients undergoing major abdominal surgery minimizes brain exposure to potential hypoxia // *Anesth. Analg.* — 2005. — Vol. 101, № 3. — P. 740-7.
29. Kahraman S., Kayali H., Atabey C., Acar F., Gocmen S. The accuracy of near-infrared spectroscopy in detection of subdural and epidural hematomas // *J. Trauma.* — 2006. — Vol. 61. — P. 1480-3.
30. Bhatia R., Hampton T., Malde S. et al. The application of nearinfrared oximetry to cerebral monitoring during aneurysm embolization: a comparison with intraprocedural angiography // *J. Neurosurg. Anesthesiol.* — 2007. — Vol. 19. — P. 97-104.
31. Haitsma I.K., Maas A.I. Monitoring cerebral oxygenation in traumatic brain injury // *Prog. Brain Res.* — 2007. — Vol. 161. — P. 207-16.
32. Hayashida M., Kin N., Tomioka T. et al. Cerebral ischaemia during cardiac surgery in children detected by combined monitoring of BIS and near-infrared spectroscopy // *Br. J. Anaesth.* — 2004. — Vol. 92. — P. 662-9.
33. Yamamoto A., Yokoyama N., Yonetani M., Uetani Y., Nakamura H., Nakao H. Evaluation of change of cerebral circulation by SpO₂ in preterm infants with apneic episodes using near infrared spectroscopy // *Pediatr. Int.* — 2003. — Vol. 45. — P. 661-4.
34. Erdoğan S., Oto A., Boşnak M. Reliability of cerebral oximeter in non-invasive diagnosis and follow-up of hypercapnia // *Turk. J. Pediatr.* — 2016. — Vol. 58, № 4. — P. 389-394.
35. Ancora G., Maranella E., Locatelli C., Pierantoni L., Faldella G. Changes in cerebral hemodynamics and amplitude integrated EEG in an asphyxiated newborn during and after cool cap treatment // *Brain Dev.* — 2009. — Vol. 31. — P. 442-4.
36. Tortoriello T.A., Stayer S.A., Mott A.R. et al. A noninvasive estimation of mixed venous oxygen saturation using near-infrared spectroscopy by cerebral oximetry in pediatric cardiac surgery patients // *Paediatr. Anaesth.* — 2005. — Vol. 15. — P. 495-503.
37. Weiss M., Dullenkopf A., Kolarova A., Schulz G., Frey B., Baenziger O. Near-infrared spectroscopic cerebral oxygenation reading in neonates and infants is associated with central venous oxygen saturation // *Paediatr. Anaesth.* — 2005. — Vol. 15. — P. 102-9.
38. Redlin M., Koster A., Huebler M. et al. Regional differences in tissue oxygenation during cardiopulmonary bypass for correction of congenital heart disease in neonates and small infants: relevance of near-infrared spectroscopy // *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* — 2008. — Vol. 136. — P. 962-7.
39. Zulueta J.L., Vida V.L., Perisinotto E., Pittarello D., Stellin G. Role of intraoperative regional oxygen saturation using near infrared spectroscopy in the prediction of low output syndrome after pediatric heart surgery // *J. Card. Surg.* — 2013. — Vol. 28, № 4. — P. 446-52.

40. Tobias J.D. Cerebral oximetry monitoring with near infrared spectroscopy detects alterations in oxygenation before pulse oximetry // *J. Intensive Care Med.* — 2008. — Vol. 23, № 6. — P. 384-8.
41. Michelet D., Arslan O., Hilly J., Mangalsuren N., Brasher C., Grace R., Bonnard A., Malbezin S., Nivoche Y., Dahmani S. Intraoperative changes in blood pressure associated with cerebral desaturation in infants // *Paediatr. Anaesth.* — 2015. — Vol. 5, № 7. — P. 681-8.
42. De Graaff J.C., Pasma W., van Buuren S., Duijghuisen J.J., Nafiu O.O., Khetarpal S., van Klei W.A. Initial values for noninvasive blood pressure in children during anesthesia: a multicentre retrospective observational cohort study // *Nesthesiology.* — 2016. — Vol. 12. — P. 904-13.
43. Verhagen E.A., van Braeckel K.N., van der Veere C.N., Groen H., Dijk P.H., Hulzebos C.V., Bos A.F. Cerebral oxygenation is associated with a neurological outcome of premature infants aged 2 to 3 years // *Dev. Med. Child Neurol.* — 2015. — Vol. 57. — P. 449-55.
44. Alderliesten T., Lemmers P.M., van Haastert I.C., de Vries L.S., Bonestroo H.J., Baerts W., van Bel F. Hypotension in preterm neonates: only low blood pressure does not affect the result of the development of the nervous system // *J. Pediatr.* — 2014. — Vol. 164. — P. 986.
45. Padmanabhan P., Oragwu C., Das B., Myers J.A., Raj A. Utility of Non-Invasive Monitoring of Cardiac Output and Cerebral Oximetry during Pain Management of Children with Sickle Cell Disease in the Pediatric Emergency Department // *Children (Basel).* — 2018. — Vol. 29. — P. 5.
46. Benaron D.A., Parachikov I.H., Cheong W.F. et al. Design of a visiblelight spectroscopy clinical tissue oximeter // *J. Biomed. Opt.* — 2005. — Vol. 10. — P. 44005.
47. Lai N., Saidel G.M., Iorio M., Cabrera M.E. Non-invasive estimation of metabolic flux and blood flow in working muscle: effect of blood-tissue distribution // *Adv. Exp. Med. Biol.* — 2009. — Vol. 645. — P. 155-60.
48. Van den Brand J.G., Verleisdonk E.J., van der Werken C. Near infrared spectroscopy in the diagnosis of chronic exertional compartment syndrome // *Am. J. Sports Med.* — 2004. — Vol. 32. — P. 452-6.
49. Wang L., Yoshikawa T., Hara T., Nakao H., Suzuki T., Fujimoto S. Which common NIRS variable reflects muscle estimated lactate threshold most closely? // *Appl Physiol. Nutr. Metab.* — 2006. — Vol. 31. — P. 612-20.
50. Weiss M., Schulz G., Teller I. et al. Tissue oxygenation monitoring during major pediatric surgery using transcutaneous liver near infrared spectroscopy // *Paediatr. Anaesth.* — 2004. — Vol. 14. — P. 989-95.
51. Kaufman J., Almodovar M.C., Zuk J., Friesen R.H. Correlation of abdominal site near-infrared spectroscopy with gastric tonometry in infants following surgery for congenital heart disease // *Pediatr. Crit. Care Med.* — 2008. — Vol. 9. — P. 62-8.
52. Smith J., Bricker S., Putnam B. Tissue oxygen saturation predicts the need for early blood transfusion in trauma patients // *Am. Surg.* — 2008. — Vol. 74. — P. 1006-11.

Получено 20.08.2018

Снісарь В.І., Павлиш А.С.

ДУ «Дніпропетровська медична академія МОЗ України», м. Дніпро, Україна

Неінвазивний моніторинг церебральної оксиметрії в дітей

Резюме. У даному огляді наведена низка літературних джерел, що описують застосування церебральної оксиметрії з використанням інфрачервоної спектроскопії у дітей. Безліч клінічних досліджень показують, що, незважаючи на деякі недоліки, неінвазивний моніторинг церебральної оксиметрії є важливим інструментом захисту мозку, в першу чергу там, де може бути присутня ятрогенна ішемія головного мозку. Зростає і кількість даних про використання інфрачервоної спектроскопії в таких галузях, як педіатрична кардіохірургія, педіатрична нейрохірургія, педіатрична і неонатальна інтенсивна

терапія. Загалом дослідження показують зростаючу роль моніторингу церебральної і соматичної оксиметрії. Цей метод є корисним як при анестезії, так і у відділеннях інтенсивної терапії. Однак на сьогодні недостатньо клінічних даних про критичні рівні вимірюваних змінних, що необхідні для безпечного ведення периопераційного періоду у сприйнятливих до церебральної ішемії пацієнтів, зокрема в педіатрії.

Ключові слова: діти; огляд; інфрачервона спектроскопія; регіональна церебральна киснева насиченість; церебральна оксиметрія; анестезія

V.I. Snisar, O.S. Pavlysh

State Institution "Dnipropetrovsk Medical Academy of the Ministry of Health of Ukraine", Dnipro, Ukraine

Non-invasive monitoring of cerebral oximetry in children

Abstract. This review presents a number of literature sources on the use of cerebral oximetry with infrared spectroscopy in children. A lot of the clinical studies show that, despite some shortcomings, non-invasive monitoring of cerebral oximetry is an important tool in brain protection, primarily if iatrogenic cerebral ischemia may be present. There is a growing number of data on the use of infrared spectroscopy in areas such as pediatric cardiosurgery, pediatric neurosurgery, pediatric and neonatal intensive care.

This method is useful in both anesthesia and intensive care units, and helps to avoid the application of more invasive monitoring methods. However, nowadays there is insufficient clinical data on the critical levels of measurable variables that are necessary for the safe management of the perioperative period in patients at risk of cerebral ischemia, in particular in pediatrics.

Keywords: children; review; infrared spectroscopy; regional cerebral oxygen saturation; cerebral oximetry; anesthesia